



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Escola Superior d'Agricultura de Barcelona

VALIDACIÓ D' ÍNDEXS ESPECTRALS PER DETERMINAR VIGOR I CLOROSI EN VINYA

Treball Final de Grau
Enginyeria Alimentària

Autora: Sonia Gironès Carranza

Tutora: Lydia Serrano

09 / 06 / 2020

Resum

La identificació de la variabilitat dels paràmetres biofísics en el cultiu d'una parcel·la és un aspecte clau per fer una bona gestió d'aquesta i obtenir el màxim rendiment. Les tècniques de teledetecció permeten identificar aquesta variabilitat, ja sigui amb sensors ubicats en satèl·lits, avions, drons, etc. Un cop caracteritzada la parcel·la, és aconsellable actuar a cada zona d'acord amb la variabilitat observada, el que s'anomena agricultura de precisió.

En aquest treball s'ha fet un estudi que es centra en la vinya. L'objectiu és validar els índexs espectrals extrets de les imatges d'una parcel·la de *Vitis vinífera* de la varietat Macabeu, que han estat capturades des de l'aire amb una càmera multiespectral muntada en un dron, per tal d'estimar vigor i clorosi.

El vigor indica el rendiment de la vinya i, potencialment, la qualitat del raïm. La clorosi indica deficiència de ferro de la vinya i té una repercussió en la capacitat fotosintètica. Per caracteritzar el vigor s'ha mesurat la fracció de radiació fotosintèticament activa interceptada (fIPAR) mitjançant un ceptòmetre i s'ha determinat la superfície foliar exposada (SFE) amb l'ajuda de la fitxa VITUR proposada per la Universitat de La Rioja. D'altra banda, per detectar presència de clorosi s'ha utilitzat un instrument òptic que permet determinar el contingut en clorofil·la de les fulles.

S'han contrastat les mesures de camp amb els índexs espectrals i els resultats mostren que els índexs CI red edge i DATT derivats de la regió del red edge són vàlids per detectar clorosi, mentre que els índexs NDVI i SAVI derivats de les bandes del roig i de l'infraroig proper són vàlids per estimar vigor.

Resumen

La identificación de la variabilidad de los parámetros biofísicos en el cultivo de una parcela es un aspecto clave para hacer una buena gestión de esta y obtener el máximo rendimiento. Las técnicas de teledetección permiten identificar esta variabilidad, ya sea con sensores ubicados en satélites, aviones, drones, etc. Una vez caracterizada la parcela, es aconsejable actuar en cada zona conforme la variabilidad observada, a esto se le llama agricultura de precisión.

En este trabajo se ha hecho un estudio que se centra en la vid. El objetivo es validar los índices espectrales extraídos de las imágenes de una parcela de *Vitis vinífera* de la variedad Macabeo, que han sido capturadas desde el aire con una cámara multiespectral montada en un dron, para determinar vigor y clorosis.

El vigor indica el rendimiento de la viña i, potencialmente, la calidad de la uva. La clorosis indica deficiencia de hierro de la vid y repercute en la capacidad fotosintética. Para caracterizar el vigor se ha medido la fracción de radiación fotosintéticamente activa interceptada (fIPAR) mediante un ceptómetro y se ha determinado la superficie foliar expuesta (SFE) con la ayuda de la ficha VITUR propuesta por la Universidad de La Rioja. Por otro lado, para detectar presencia de clorosis se ha utilizado un instrumento óptico que permite determinar el contenido en clorofila de las hojas.

Se han contrastado las medidas de campo con los índices espectrales y los resultados muestran que los índices CI red edge y DATT derivados de la región del red edge son válidos para detectar clorosis, mientras que los índices NDVI y SAVI derivados de las bandas del rojo y del infrarrojo próximo son válidos para determinar vigor.

Abstract

The identification of variability in biophysical parameters on a plot is a key aspect to make a good management of it and obtain the maximum yield. Remote sensing techniques allow identifying this variability, either with sensors located on satellites, aircraft, drones, etc. Once the plot is characterized, it is advisable to act according the variability observed in each area, this technique is named precision agriculture.

In this work it has been done a study focused on the vine. The objective of the main work is validate the spectral indices extracted from the images of a plot of *Vitis vinifera* of Macabeu variety, which have been captured from the air with a multispectral camera mounted on a drone, to determine vigor and chlorosis.

Vigor indicates the yield of the vineyard and the potential quality of the grape. Chlorosis indicates iron deficiency in the vineyard and has a strong impact on photosynthetic capacity. To characterize vigor, the intercepted photosynthetically active radiation fraction was measured using a ceptometer and the exposed leaf area was determined with the help of the VITUR sheet proposed by the University of La Rioja. On the other hand, to detect the presence of chlorosis an optical instrument has been used to determine the chlorophyll content of the leaf.

Field measurements have been contrasted with spectral indices and the results show that the CI red edge and DATT indices derived from the red edge region are valid for detecting chlorosis, while the NDVI and SAVI indices derived from the red and near infrared band are valid for determining vigor.

Sumari

1. INTRODUCCIÓ	9
1.1. Agricultura de precisió.....	9
1.1.1. Teledetecció	9
1.2. La vinya	11
1.2.1. Paràmetres biofísics	11
1.2.2. Resolució espacial en la teledetecció en vinya	13
2. OBJECTIUS	14
3. MATERIAL I MÈTODES	15
3.1. Cultiu.....	15
3.2. Lloc d'estudi.....	15
3.3. Punts de mostreig.....	16
3.4. Paràmetres biofísics	17
3.4.1. Vigor.....	17
3.4.2. Contingut de clorofil·la.....	18
3.5. Imatges	21
3.5.1. Índexs espectrals	21
3.5.2. Estudi estadístic.....	23
4. RESULTATS	24
4.1. Paràmetres biofísics	24
4.1.1. Vigor.....	24
4.1.2. Clorofil·la.....	25
4.2. Imatges	27
4.2.1. Índexs espectrals	27
5. DISCUSSIÓ DE RESULTATS	31
5.1. Vigor.....	31
5.2. Clorosi	32
CONCLUSIONS	33
BIBLIOGRAFIA	34

ÍNDEX DE FIGURES

Figura 1. Corba estàndard de reflectivitat de la vegetació. _____	10
Figura 2. Espectre de transmitància d'una fulla _____	13
Figura 3. Parcel·la d'estudi a Espiells _____	15
Figura 4. Diagrama ombrotèrmic de temperatura i precipitació mitjana mensual de l'any 2017 de l'estació meteorològica de Sant Sadurní d'Anoia _____	16
Figura 5. Parcel·la d'estudi amb cada zona i punt de mostreig identificats _____	16
Figura 6. Mesura de la distància entre ceps pel càlcul de la SFE _____	17
Figura 7. Ceptòmetre _____	17
Figura 8. Lector de clorofil·la MC-100 _____	18
Figura 9. Lector de clorofil·la CCM 200 plus _____	18
Figura 10. Selecció de fulles pel calibratge de clorofil·la _____	19
Figura 11. Procediment emprat per l'extracció de clorofil·la al laboratori _____	19
Figura 12. Espectrofotòmetre d'absorció molecular _____	20
Figura 13. Dron amb la càmera incorporada _____	23
Figura 14. Superfície foliar exposada (SFE) a cada zona de mostreig de la parcel·la _____	24
Figura 15. Percentatge de radiació fotosintèticament activa interceptada (%fIPAR) a cada zona de mostreig de la parcel·la _____	25
Figura 16. Contingut de clorofil·la en unitats CCI a cada zona de mostreig de la parcel·la _____	25
Figura 17. Relació entre unitats CCI i contingut de clorofil·la en fulla en ceps de la varietat Macabeu _____	26

Figura 18. Contingut de clorofil·la en $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ a cada zona de mostreig de la parcel·la	26
Figura 19. Relació entre l'índex SAVI i la SFE en ceps de la varietat Macabeu	27
Figura 20. Relació entre l'índex NDVI i la SFE en ceps de la varietat Macabeu	27
Figura 21. Relació entre l'índex SAVI i la fIPAR en ceps de la varietat Macabeu	27
Figura 22. Relació entre l'índex NDVI i la fIPAR en ceps de la varietat Macabeu	27
Figura 23. Relació entre l'índex Clred edge i el contingut de clorofil·la en fulla en ceps de la varietat Macabeu	28
Figura 24. Relació entre l'índex DATT i el contingut de clorofil·la en fulla en ceps de la varietat Macabeu	28
Figura 25. NDVI a cada zona de mostreig de la parcel·la	28
Figura 26. SAVI a cada zona de mostreig de la parcel·la	29
Figura 27. Cl red edge a cada zona de mostreig de la parcel·la	29
Figura 28. DATT a cada zona de mostreig de la parcel·la	30

ÍNDEx DE TAULES

Taula 1. Fórmules pel càlcul d' índexs espectrals de la regió del NIR i visible _____	21
Taula 2. Fórmules pel càlcul d' índexs espectrals de la regió del Red Edge _____	22
Taula 3. Característiques de la càmera multiespectral _____	22

AGRAÏMENTS

Abans de començar, vull dedicar aquesta pàgina a qui ha estat important al llarg d'aquest camí i en aquesta etapa final d'estudi:

Als meus pares Montse i Antonio, per l'amor i suport incondicional, animar-me a no rendir-me i fer-me veure que un petit esforç ara valdrà molt la pena demà.

A la meva germana Sara, en qui sempre m'he fixat i ha estat el meu model a seguir, t'admiro molt.

A la meva tutora Lydia, per la implicació i interès mostrat en tot moment, un somriure i una frase motivadora en el moment necessari té un gran valor.

A les docents Patricia Jiménez i Montserrat Pujolà, i a les tècniques Mireia Ribet i Toñi Robles per guiar-me i donar suport quan vaig realitzar els diferents assajos al laboratori.

A vosaltres, GRÀCIES de tot cor.



1. INTRODUCCIÓ

Les tècniques tradicionals per treballar el cultiu en l'agricultura es basen en recomanacions generals per extensions relativament grans. Així, es generalitzen labors, sense tenir en compte les especificitats pròpies del lloc i del cultiu. Aquest fet ha provocat processos de degradació ambiental i d'ineficiència en l'ús dels recursos disponibles. Com a conseqüència, s'ha limitat la potencialitat del cultiu i s'han elevat els costos de producció.

Actualment es requereix que la producció agrícola minimitzi els impactes ambientals negatius de les seves activitats i sigui competitiva en mercats globalitzats cada vegada més exigents en preu i qualitat (Leiva, 2003).

1.1. Agricultura de precisió

L'agricultura de precisió busca optimitzar el sistema de producció agrícola tenint en compte la variabilitat del cultiu i terreny. És necessari identificar els paràmetres biofísics que senyalen aquesta variabilitat. D'aquesta manera s'estableixen estratègies per utilitzar els inputs necessaris en la quantitat requerida, el lloc adequat i el moment oportú (García & Flego, 2007).

1.1.1. Teledetecció

Una de les tecnologies que s'utilitzen per obtenir informació sobre l'estat del cultiu en agricultura de precisió és la teledetecció. Consisteix en recollir informació del terreny mitjançant sensors ubicats ja sigui en satèl·lits a l'aire, avions, drons, o al propi terreny. Aquests sensors capten informació de les ones electromagnètiques a diferents bandes de l'espectre i mitjançant una sèrie de combinacions algebraiques es calculen índexs espectrals, que mostren la variabilitat de certs paràmetres biofísics al terreny. Un cop calculats, es creen mapes que mostren la variabilitat espacial (Martínez-Casanovas & Arnó, 2014).

La vegetació sana té una signatura espectral única (Figura 1). Les plantes malaltes poden ser identificades, perquè difereixen en aquesta signatura. Els pigments de la fulla, l'estructura de la cèl·lula i el contingut d'aigua són factors que determinaran aquesta signatura espectral.

En les bandes visibles, la reflectivitat és relativament baixa ja que la majoria de la llum és absorbida pels pigments de les fulles. La clorofil·la absorbeix fortament l'energia en les longituds d'ona blava i vermella i reflecteix més longituds d'ona verdes. És per això que la vegetació saludable és més verda.

Per a una vegetació saludable, la reflectivitat és molt major a la regió de l'infraroig pròxim (NIR) que a la regió visible a causa de l'estructura cel·lular de les fulles. Per tant, la vegetació saludable es pot identificar fàcilment per l'alta reflectivitat al NIR i generalment per la baixa reflectivitat al visible.

La reflectivitat en les longituds d'ona infraroja d'ona curta està relacionada amb el contingut d'aigua de la vegetació i la seva estructura. L'aigua té fortes bandes d'absorció al voltant d'1.45, 1.95 i 2.50 μm .

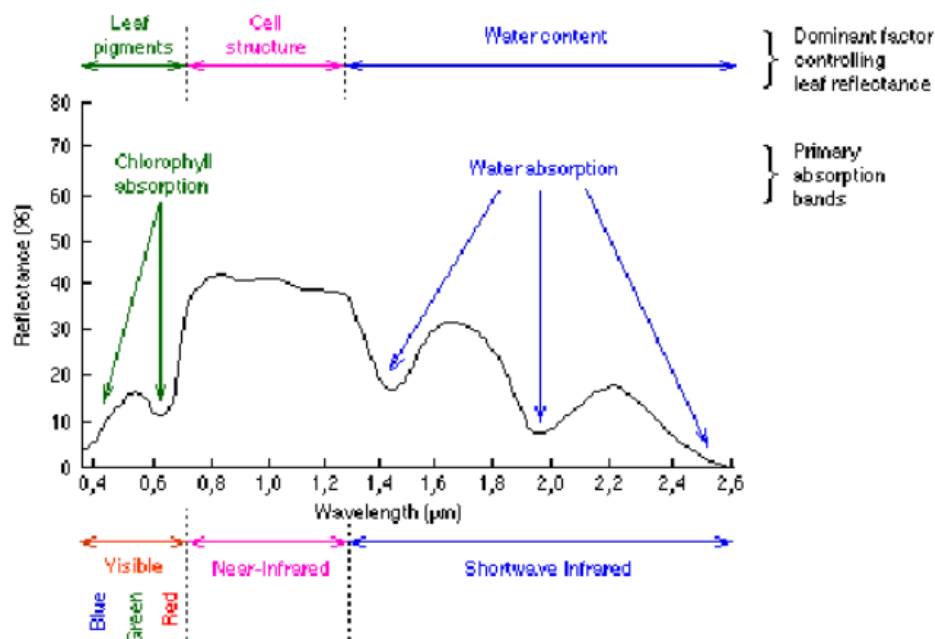


Figura 1. Corba estàndard de reflectivitat de la vegetació.

Font: Rodríguez-Rey (2009)

1.2. La vinya

1.2.1. Paràmetres biofísics

La identificació de la variabilitat dels paràmetres biofísics de la vinya és un aspecte clau per gestionar el rendiment i la qualitat del raïm. Aquest treball es centra en l'estudi dels següents paràmetres: vigor i clorosi.

A) Vigor

El vigor de la vinya indica el rendiment i la qualitat potencial del raïm. Està determinat per varis factors com l'estat sanitari de les fulles i raïms, coloració, la superfície foliar exposada (SFE) i la fracció de radiació fotosintèticament activa interceptada (fIPAR).

Superfície foliar exposada

La superfície foliar exposada són els metres quadrats de fulla exposada correctament il·luminada. S'expressa en metres quadrats per cep. Els paràmetres mètrics proposats a la fitxa VITUR per determinar-la són els següents (Tardàguila & Martínez, 2004):

- e: amplada de vegetació (m)
- h: alçada de vegetació (m)
- T: percentatge de forats a la vegetació. Mesura de densitat (%)
- d: distància entre ceps dins de la filera (m)
- D: distància entre fileres (m)
- Kv: coeficient de vegetació.

La SFE es dedueix de l'Equació 1, pel mètode d'Argillier.

$$SFE/cep (Argillier) = (2h + 1,5e) \times T \times d \times Kv \quad (\text{Equació 1})$$

Fracció de radiació fotosintèticament activa interceptada

L'energia absorbida pel cultiu per dur a terme la fotosíntesi és la compresa a la regió de l'espectre 400-700 nm i es denomina radiació fotosintèticament activa, en anglès, photosynthetically active radiation (PAR). Així, la fracció de radiació PAR interceptada és anomenada fIPAR.

El %fIPAR es dedueix de l'Equació 2 (Catasús & Fernández, 2008), on:

$$\%fIPAR = \frac{PAR_I - PAR_T}{PAR_I} \cdot 100 \quad (\text{Equació 2})$$

PAR_T : PAR transversal. Valor que s'obté amb la mitjana de les 6 lectures sota el cep.

PAR_I : PAR incident. Valor de la lectura sobre la coberta vegetal.

B) Clorosi

Es coneix per clorosi a la nutrició deficient en ferro que afecta als processos metabòlics d'assimilació de les plantes. El nom fa referència al principal símptoma: les fulles presenten una coloració groga a causa de la inhibició de la síntesi de clorofil·la (Catalina-Tomás, 2015). Les fulles afectades són les més joves, per l'escassa mobilitat del Fe en el floema de la planta. Si persisteix, es pot arribar a una decoloració total de les fulles, amb defoliació i mort de la planta en casos extrems. L'activitat fotosintètica es veu reduïda segons que el contingut en clorofil·la va disminuint, amb la qual cosa la clorosi fèrrica provoca una reducció del creixement de brots i fulles, i escàs creixement i maduració del fruit (Hidalgo, 1999). Com a conseqüència, el rendiment de la planta es veu reduït.

La clorofil·la presenta fortes bandes d'absorbància en el blau i el vermell, però no en el verd i infraroig. Els lectors de clorofil·la utilitzen aquesta característica per determinar la concentració de clorofil·la. S'irradien dues longituds d'ona sobre la fulla: una cau dins del rang d'absorbància de clorofil·la (653nm) mentre que l'altra no (931nm), i serveix per compensar les diferències mecàniques com el gruix del teixit (Figura 2). L'aparell mesura la transmissió de les dues longituds d'ona i calcula un valor CCI (índex de contingut de clorofil·la) que és proporcional a la quantitat de clorofil·la a la mostra.

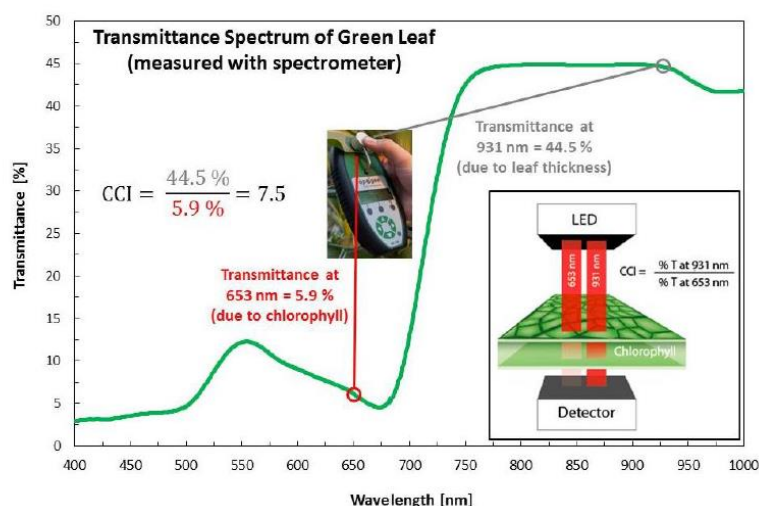


Figura 2. Espectre de transmissió d'una fulla

Font: Apogee Instruments (2020)

1.2.2. Resolució espacial en la teledetecció en vinya

Les tecnologies de teledetecció s'utilitzen àmpliament en viticultura de precisió perquè brinden rapidesa, no destructivitat, i caracterització espacial de la grandària i vigor de la vinya, que són indicadors potencials del rendiment i la qualitat del raïm (González-Flor, Serrano, Gorchs & Pons, 2014). L'aplicabilitat d'imatges satèl·lit o aèries capturades per avions tripulats en el cultiu de la vinya s'ha vist limitada per resolucions espacials baixes (entre 50-200 cm), alts costos operatius i complexitat. L'ús de vehicles aeris no tripulats, també anomenats drons, permet la captura d'imatges aèries amb una resolució espacial ultra alta (entre 4-5 cm), a temps reals i amb un baix cost operatiu.

Les imatges contenen elements diferents a les vinyes, és a dir, vegetació del sòl, fusta, ombres, etc. Per tant, a l'hora de crear mapes precisos, tota la vegetació que no siguin fileres de vinyes ha de ser identificada i eliminada per obtenir una estimació precisa dels paràmetres biofísics de la planta. Les similituds en la resposta espectral entre vinya i una altra vegetació com l'herba fan que sigui difícil diferenciar-les. L'alta resolució de les imatges dels drons permet detectar detalls que no eren visibles en imatges aèries o satel·litàries de baixa resolució, ja que resolucions superiors a 25 cm donen problemes en la classificació de la vegetació, detecció d'ombres, etc. (Poblete-Echeverría, Olmedo, Ingram & Bardeen, 2017).

2. OBJECTIUS

L'objectiu general d'aquest treball és:

- Validar la utilitat de les imatges obtingudes amb una càmera multiespectral, embarcada en un dron, per determinar les característiques biofísiques a una parcel·la de vinya situada a Espiells (Penedès).

Els objectius específics d'aquest treball són els següents:

- Fer una anàlisi de les imatges i corregir-les per eliminar les àrees que no estan cobertes per vegetació.
- Estudiar les relacions entre els índexs espectrals extrets de les imatges i les variables que proporcionen informació de vigor i clorosi mesurades al camp (superfície foliar exposada, fracció de radiació fotosintèticament activa interceptada i contingut de clorofil·la).
- Fer un calibratge de la clorofil·la a fulles de la varietat Macabeu amb les unitats CCI (Chlorophyll Content Index, que és l'índex de contingut de clorofil·la relatiu) proporcionades per un instrument òptic, i determinar el rang de valors que senyalen clorosi a les fulles.

3. MATERIAL I MÈTODES

3.1. Cultiu

El conjunt de dades van ser preses durant la temporada de verema del 2019 a una parcel·la de vinya (*Vitis vinifera* L.) de la varietat Macabeu.

El seu fruit, el raïm, és comestible i matèria prima per a la fabricació de vi i altres begudes alcohòliques. Actualment, el seu ús s'estén per tots els països de climes temperats. La vinya presenta requeriments de fred per a una adequada ruptura de la dormició i inici de la nova estació de creixement.

3.2. Lloc d'estudi

La parcel·la està situada a Espiells (Alt Penedès, Barcelona). Les vinyes empeltades presenten una distància entre fileres de 2.5 m, i una distància dins de les fileres d'1 m. El sòl té una textura franc argilosa (Figura 3).



Figura 3. Parcel·la d'estudi a Espiells

Font: pròpia

El clima a la zona és mediterrani. És un clima suau i sec, amb poca pluviometria. El període d'estiu és calorós i sec, sent primavera i tardor les estacions on plou més, mentre que l'hivern no és massa fred. Com s'observa a la Figura 4, a l'any 2017 els mesos més plujosos van ser març i octubre i el mesos més calorosos van ser juliol i agost. Es mostren dades de l'any 2017 perquè són les últimes que s'han actualitzat a la web del Servei Meteorològic de Catalunya, no hi ha dades disponibles del 2019.

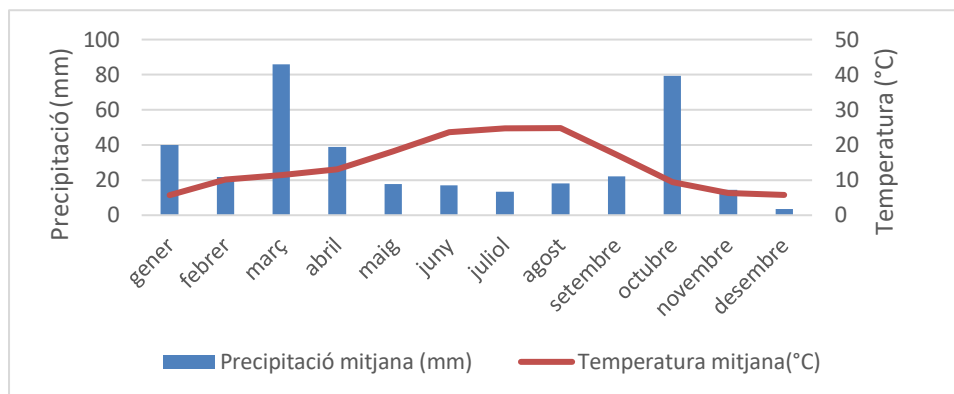


Figura 4. Diagrama ombrotèrmic de temperatura i precipitació mitjana mensual de l'any 2017 de l'estació meteorològica de Sant Sadurn d'Anoia

Font: www.meteocat.cat

3.3. Punts de mostreig

A la Figura 5 es mostra la localització de les zones i punts de mostreig on es van dur a terme les mesures. Hi ha un total de 16 ceps, seleccionats en base al mapa de vigor creat a partir d'un anterior vol, dels quals es va anotar les coordenades (per conèixer la posició exacta).

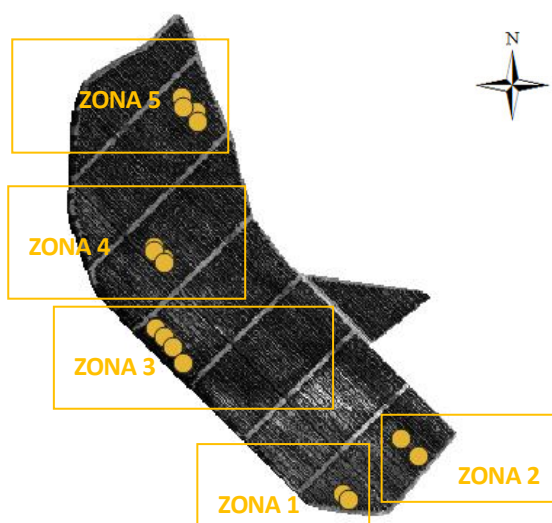


Figura 5. Parcel·la d'estudi amb cada zona i punt de mostreig identificats (escala 1:5000)

Font: pròpia

3.4. Paràmetres biofísics

3.4.1. Vigor

A) Superfície foliar exposada

Es va caracteritzar els 16 ceps seleccionats en base als paràmetres proposats per la fitxa VITUR mitjançant mesures mètriques i valoracions visuals de la vinya.



Figura 6. Mesura de la distància entre ceps pel càlcul de la SFE

Font: pròpia

B) Fracció de radiació fotosintèticament activa interceptada

Amb un ceptòmetre (Figura 7) es van fer un total de 7 mesures per cep: 6 mesures sota el cep i 1 sobre la coberta vegetal. Les mesures es van fer al migdia solar, el dia era solejat i el cel estava obert (condicions favorables).



Figura 7. Ceptòmetre

Font: <http://interfase3.com.ar/portfolio-items/ceptometro-accupar-lp-80/>

Escola Superior d'Agricultura de Barcelona

UPC - BarcelonaTech



3.4.2. Contingut de clorofil·la

Amb un lector de clorofil·la (instrument òptic) es va mesurar la concentració de clorofil·la a les fulles dels 16 ceps seleccionats (4 mesures per cep).

Es van utilitzar dos models diferents:

- MC-100: per la presa de dades al camp.



Figura 8. Lector de clorofil·la MC-100

Font: <https://www.lab-ferrer.com/sensores/instrumentacion-y-sensores/medidor-de-clorofila.html>

- CCM 200 plus: per fer el calibratge de clorofil·la al laboratori.



Figura 9. Lector de clorofil·la CCM 200 plus

Font: pròpia

Existeix una relació no lineal entre CCI i concentració de clorofil·la, i és diferent per a diferents espècies de plantes. Per tal de trobar aquesta relació en la varietat de vinya Macabeu es van recollir 20-25 fulles de diferent coloració (de groc a verd, veure Figura 10) per fer un calibratge de la concentració de clorofil·la al laboratori i fer la conversió d'unitats CCI a $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ fulla.

El procediment emprat per realitzar l'extracció de clorofil·la va ser el següent. Mitjançant un punxó cilíndric buit per dins, es van extreure "discos" de fulla i es van submergir en tubs d'assaig amb dimetilsulfòxid (DMSO) recoberts amb paper d'alumini, ja que la clorofil·la és sensible a la llum. El mètode d'extracció de clorofil·la pel DMSO és via calorífica, es van escalfar els tubs a 65°C durant 2h en un bany i es va extreure (Barnes, Balaguer & Manrique, 1992). A continuació, es va passar el líquid extractat per l'espectrofotòmetre i va fer la lectura d'absorbància a les longituds d'ona de 649 i 665 nm, màxims d'absorció per la clorofil·la a i b, en el cas d'utilitzar DMSO com a dissolvent (Figura 11).



Figura 10. Selecció de fulles pel calibratge de clorofil·la

Font: pròpia

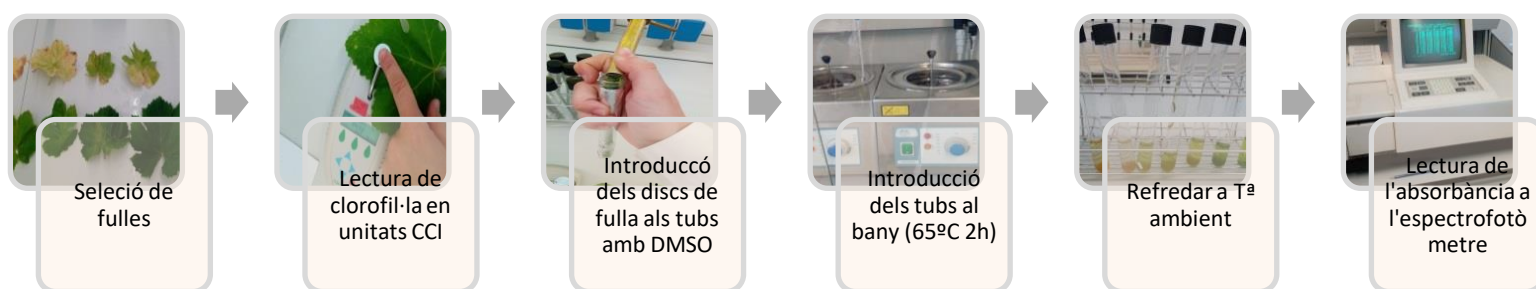


Figura 11. Procediment emprat per realitzar l'extracció de clorofil·la al laboratori

Font: pròpia

La clorofil·la a es va deduir de l'Equació 3, i la clorofil·la b de l'Equació 4. Sumant aquestes dues es va obtenir el valor de clorofil·la total (Equació 5).

$$Chl_a(\mu g/ml) = 12,47 \times A_{665} - 3,62 \times A_{649} \quad (\text{Equació 3})$$

$$Chl_b(\mu g/ml) = 25,06 \times A_{649} - 6,50 \times A_{665} \quad (\text{Equació 4})$$

$$Chl_{total}(\mu g/ml) = Chl_a(\mu g/ml) + Chl_b(\mu g/ml) \quad (\text{Equació 5})$$

Per obtenir el resultat en $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ de fulla es va realitzar el següent factor de conversió, on:

$$\frac{x \mu g}{ml \text{ DMSO}} \times \frac{10 \text{ ml DMSO}}{5 \text{ discs}} \times \frac{1 \text{ disc}}{1,13 \times 10^{-4} \text{ m}^2} \times \frac{1 \text{ g}}{10^6 \mu g} \times \frac{1 \text{ mol}}{892,3 \text{ g}} \times \frac{10^6 \mu\text{mol}}{1 \text{ mol}} = \frac{10x}{0,5} = \frac{20x \mu\text{mol}}{\text{m}^2}$$

1 disc = 12 mm diàmetre

$$\text{Àrea d'un disc} = \pi r^2 = \pi 0,6 \text{ cm}^2 = 1,13 \text{ cm}^2 = 1,13 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$



Figura 12. Espectrofotòmetre d'absorció molecular (Marca i model: Shimadzu UV-160)

Font: pròpia

3.5. Imatges

3.5.1. Índexs espectrals

Es va fer volar un dron al qual es va incorporar una càmera multiespectral i va captar les imatges per, posteriorment, extreure els índexs espectrals. A partir de les imatges, mitjançant el programa QGIS, es va seleccionar una àrea representativa de les coordenades dels 16 ceps seleccionats.

Aquesta àrea es va designar amb el nom de ROI (region of interest) manual. Es va seleccionar, manualment, una àrea tancada que només contingues cep, és a dir, que no inclogues ombres, sol, o altres aspectes no desitjats, ja que obtindríem valors no representatius.

Per a calcular els índexs espectrals, la informació del canal de color (números digitals) va ser extreta dels arxius JPEG per cada ROI establerta, també mitjançant el programa QGIS. Es va extreure la informació de cadascun dels cinc canals de color per separat: RGB (Red, Green, Blue), Red Edge i Near IR.

Amb les combinacions matemàtiques d'aquests números digitals mostrades a les Taules 1 i 2 es va extreure els índexs espectrals (on R és un número digital).

Taula 1. Fórmules pel càlcul d' índexs espectrals de la regió del NIR i visible

Font: elaborada per Lydia Serrano (tutora del projecte)

NIR				
Banda	Nombre	Acronimo	Formulacion	Referencia
NIR / Vis	Normalized Difference Vegetation Index	NDVI	$(R_n - R_r) / (R_n + R_r)$	Rouse et al. (1974) and Tucker (1979)
	Simple Ratio	SR	R_n / R_r	Jordan (1969) and Pearson and Miller (1972)
	Índice de vegetación ajustado al suelo.	SAVI	$(1 + 0.5) (R_n - R_r) / (R_n + R_r + 0.5)$	Huete (1988)
	Índice de vegetación ajustado al suelo modificado.	MSAVI	$0.5(2 \cdot R_n + 1 - \sqrt{[(2 \cdot R_n + 1)^2 - 8(R_n - R_r)]})$	Qi et al. (1994)
	Índice de vegetación ajustado al suelo optimizado	OSAVI	$(1 + 0.16) (R_n - R_r) / (R_n + R_r + 0.16)$	Rondeaux et al. (1996)
	Green Normalized Difference Vegetation Index	GNDVI	$(R_n - R_g) / (R_n + R_g)$	Gitelson et al. (1996)
	Green Simple Ratio GSR	GSR	R_n / R_g	(Fernández, Gorchs, Serrano, 2019)
	Índice de clorofila verde	CI-G	$R_n / R_g - 1$	Gitelson et al. (2003)
	Índice de vegetación triangular	TVI	$0.5[120(R_n - R_g) - 200(R_r - R_g)]$	Broge and Leblanc (2000)
	Segundo índice de vegetación triangular modificado.	MTVI2	$1.5[2.5(R_n - R_g) - 2.5(R_r - R_g)] / \sqrt{[(2 \cdot R_n + 1)^2 - 6 \cdot R_n]}$	Haboudane et al. (2004)
	Índice de clorofila vegetación	CVI	$R_n \cdot R_r / R_g$	Vincini et al. (2008)
VISIBLE				
Banda	Nombre	Acronimo	Formulacion	Referencia
B / R	Blue-Red Simple Ratio	BR	R_b / R_r	(Fernández, Gorchs, Serrano, 2019)
B / G	Green-Blue Simple Ratio	GB	R_g / R_b	(Fernández, Gorchs, Serrano, 2019)
G / R	Green-Red Simple Ratio	GR	R_g / R_r	(Gamon y Surfus, 1999)
	Normalized Difference Vegetation Index-Green	NDVIg	$(R_g - R_r) / (R_g + R_r)$	(Tucker, 1979 y Gitelson, 2002)
	Soil Adjusted Vegetation Index—Green	SAVI _g	$[(1 + 0.5) (R_g - R_r) / (R_g + R_r + 0.5)]$	(Chen, 2010)
	Optimized Soil Adjusted Vegetation Index—Green	OSAVI _g	$[1.5 (R_g - R_r) / (R_g + R_r + 0.16)]$	(Widjaja y Soni, 2008)
R / G / B	Índice de resistencia atmosférica visible.	VARI	$(R_g - R_r) / (R_g + R_r - R_b)$	Gitelson et al. (2002)
	Red-Green-Blue Normalized Difference Vegetation Index	NDVI _{rgb}	$[(R_g + R_b) \cdot R_r / (R_g + R_b + R_r)]$	(Widjaja y Soni, 2008)
	Índice de hoja verde	GLI	$(2 \cdot R_g - R_r - R_b) / (2 \cdot R_g + R_r + R_b)$	Louhaichi et al. (2001)
	Strength of red	StR	$R_r / (R_r + R_g + R_b)$	Gillespie, Kahle & Walker (1987)
	Strength of green	StG	$R_g / (R_r + R_g + R_b)$	Gillespie, Kahle & Walker (1987)
	Green Excess Index	GEI	$2 \cdot R_g / (R_r + R_b)$	Woebbecke et al. (1995)
	Strength of blue	StB	$R_b / (R_r + R_g + R_b)$	Gillespie, Kahle & Walker (1987)
	Índice de verdor triangular	TGI	$-0.5[(r - b)(R_r - R_g) - (r - g)(R_r - R_b)]$	Hunt et al. (2011)

Taula 2. Fórmules pel càlcul d' índexs espectrals de la regió del Red Edge

Font: pròpia

Red Edge				
Banda	Nombre	Acrónimo	Formulació	Referencia
Red Edge	Red edge chlorophyll index	Clred dege	$NIR / (RE - 1)$	Gitelson et al. (2003)
	DATT	DATT	$(NIR - RE) / (NIR - R)$	Datt (1999)

La càmera utilitzada va ser una MicaSense, amb el model de sensor Red Edge MX. A la Taula 3 es descriuen les característiques d'aquesta. Disposa de GPS integrat i té capacitat de capturar 5 bandes espectrals: RGB (Red, Green and Blue), Red Edge i near IR.

Taula 3. Característiques de la càmera multispectral

Font: <https://www.micasense.com/rededge-mx>

Nom	Red Edge MX
Marca	MicaSense
Dimensions	8.7cm x 5.9cm x 4.54cm
Pes	231.9 g
Resolució	8 cm per pixel (per banda) a 120 m
Bandes espectrals	Blau, verd, vermell, Red Edge, infraroig pròxim (near IR)
Longitud d'ona (nm)	Blau (475 nm centre, 20 nm d'amplada de banda), verda (560 nm centre, 20 nm d'amplada de banda), vermell (668 nm centre, 10 nm d'amplada de banda), red edge (717 nm centre, 10 nm d'amplada de banda), infraroig pròxim (840 nm centre, 40 nm d'amplada de banda)





Figura 13. Dron amb la càmera incorporada

Font: <https://www.micasense.com/rededge-mx>

3.5.2. Estudi estadístic

Amb el programa estadístic SPSS 25.0, es van estudiar les relacions entre els resultats de camp i els índexs espectrals extrets de les imatges per tal de determinar si havia relacions significatives.

4. RESULTATS

4.1. Paràmetres biofísics

4.1.1. Vigor

A) Superfície foliar exposada

A la Figura 14, s'observen els resultats de la superfície foliar exposada (SFE) expressada en metres quadrats per cep calculada a partir de la fórmula d'Argillier.

Els rang de superfície foliar exposada va de 2 a 5 m²/cep (Sancha, 2015). Valors 2-3 m²/cep indiquen una SFE baixa, valors 3-4 m²/cep mitjana i valors de 4-5 m²/cep alta.

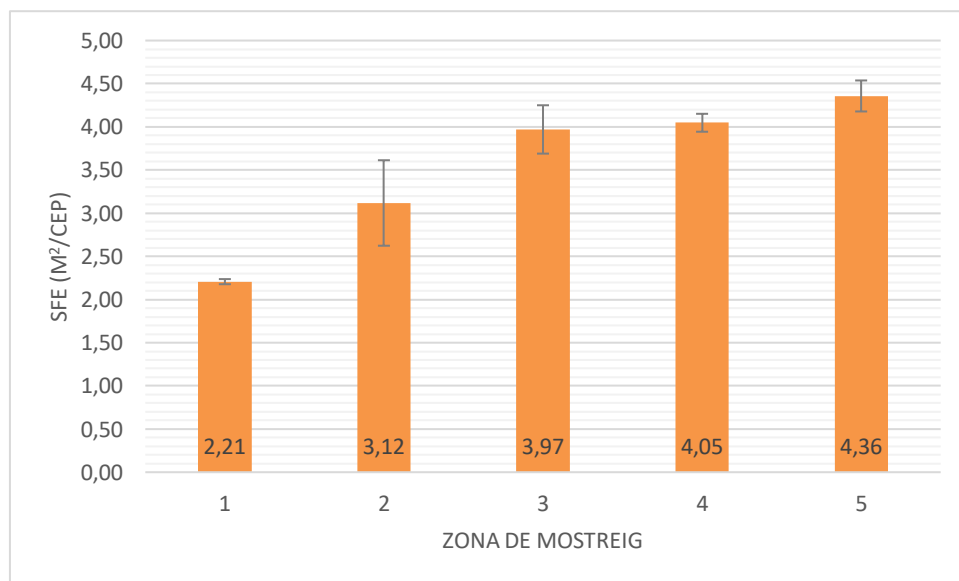


Figura 14. Superfície foliar exposada (SFE) a cada zona de mostreig de la parcel·la. Els valors són la mitjana i error estàndard de la mitjana (n=16)

Font: pròpia

B) Fracció de radiació fotosintèticament activa interceptada

A la Figura 15, s'observen els resultats del percentatge de radiació fotosintèticament activa interceptada (%fIPAR), calculats a partir de les mesures amb el ceptòmetre.

El rang de fIPAR va de 0 a 100 %. Sent 0 una radiació interceptada nul·la i 100 el total de la radiació interceptada.

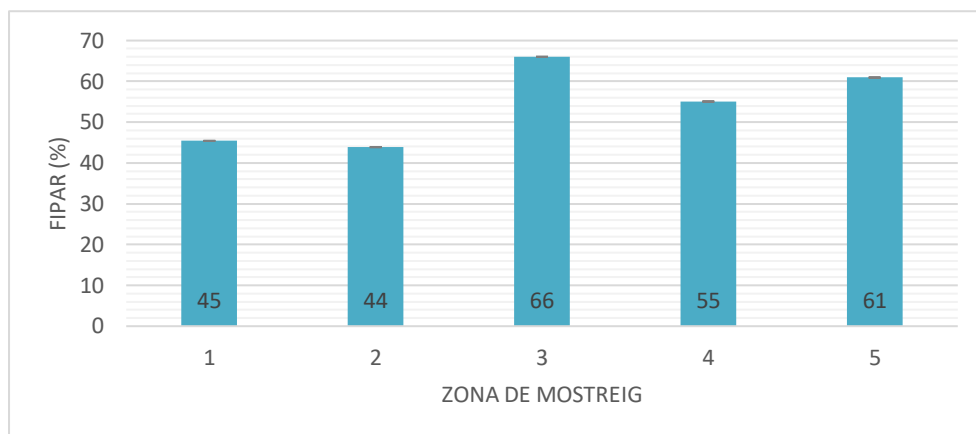


Figura 15. Percentatge de radiació fotosintèticament activa interceptada (%fIPAR) a cada zona de mostreig de la parcel·la. Els valors són la mitjana i error estàndard de la mitjana (n=16)

Font: pròpia

4.1.2. Clorofil·la

A la Figura 16, s'observen els resultats del contingut de clorofil·la en unitats CCI, extrets de les mesures amb el lector de clorofil·la.

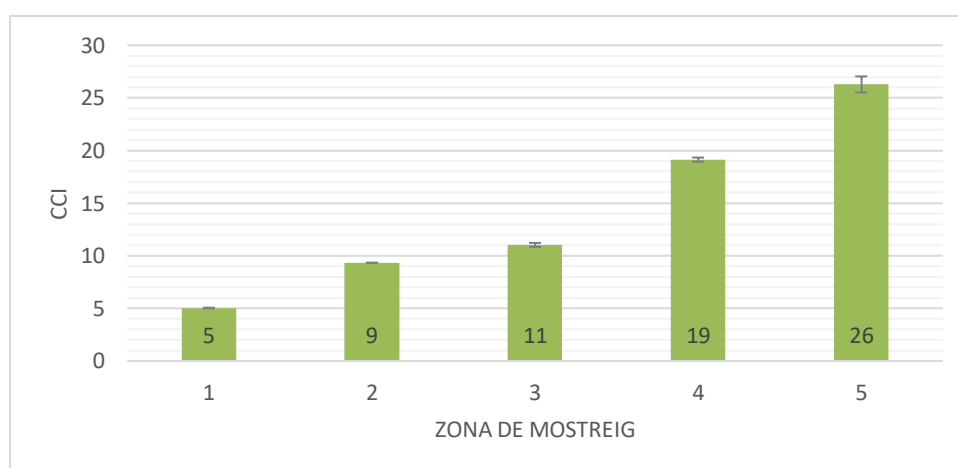


Figura 16. Contingut de clorofil·la en unitats CCI a cada zona de mostreig de la parcel·la. Els valors són la mitjana i error estàndard de la mitjana (n=16)

Font: pròpia

A la Figura 17 s'observa la relació entre unitats CCI i $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ per la varietat Macabeu, creada a partir dels valors de clorofil·la extractats amb DMSO de la selecció de fulles i les mesures amb el CCM-200 plus. El rang obtingut de clorofil·la va de 18 a $360 \mu\text{mol}/\text{m}^2$. Fulles de tonalitats grogues assolixen valors de $18\text{-}120 \mu\text{mol}/\text{m}^2$, fulles verd clar $120\text{-}270 \mu\text{mol}/\text{m}^2$ i fulles verd obscur $270\text{-}360 \mu\text{mol}/\text{m}^2$.

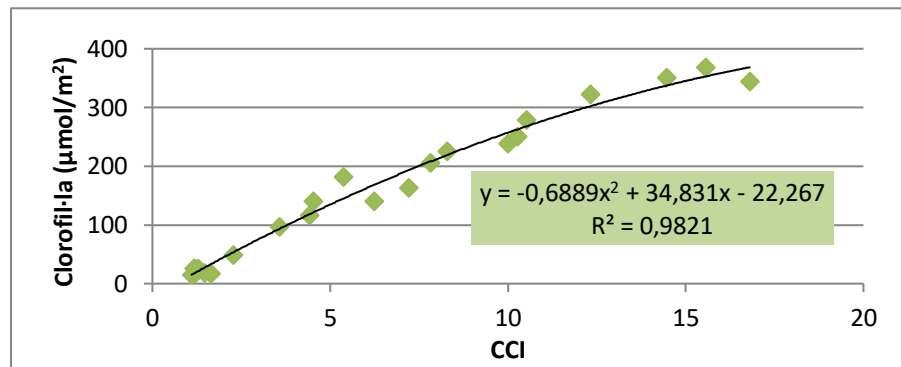


Figura 17. Relació entre unitats CCI i contingut de clorofil·la en fulla en ceps de la varietat Macabeu (n=23)

Font: pròpia

A la Figura 18, s'observen els resultats del contingut de clorofil·la en $\mu\text{mol}/\text{m}^2$.

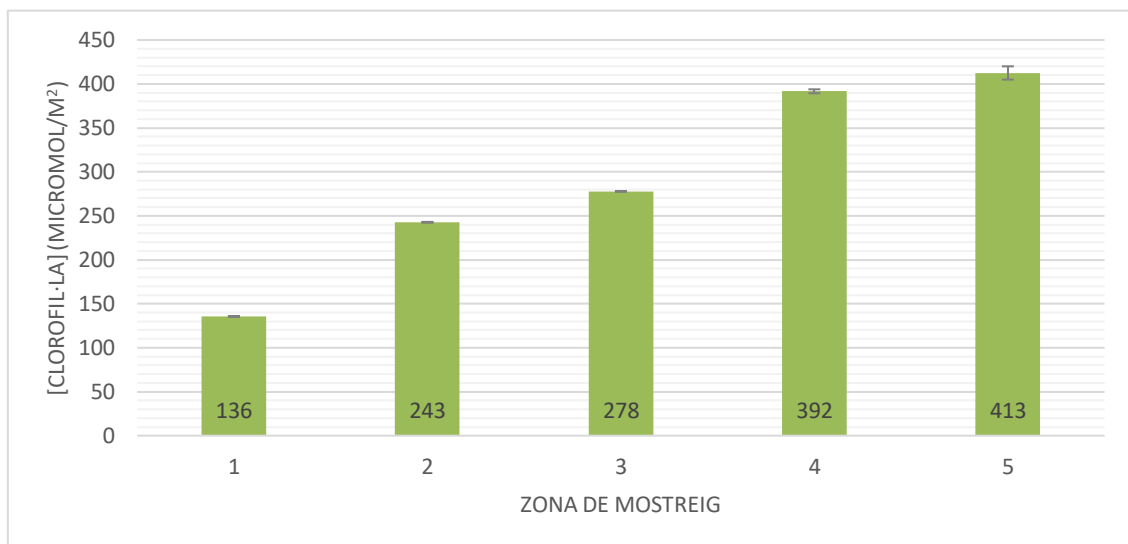


Figura 18. Contingut de clorofil·la en $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ a cada zona de mostreig de la parcel·la. Els valors són la mitjana i error estàndard de la mitjana (n=16)

Font: pròpia

4.2. Imatges

4.2.1. Índexs espectrals

Es va crear una taula de correlacions amb les variables de camp i els índexs espectrals calculats amb les fórmules de les Taules 1 i 2 que s'han mostrat a l'apartat 3.5.1. De totes les correlacions estudiades, en aquest apartat es mostren únicament les més significatives a nivell 0,01 (1% d'error), representades a les Figures 19, 20, 21, 22, 23 i 24 mitjançant diagrames de dispersió que relacionen els índexs (Índex de Vegetació de Diferència Normalitzada (NDVI), Índex de Vegetació Ajustat al Sòl (SAVI), Índex de Clorofil·la del red edge (Clred edge) i DATT (índex de clorofil·la, el nom fa referència a l'autor que el va crear) i les variables de camp (SFE, fIPAR, clorofil·la).

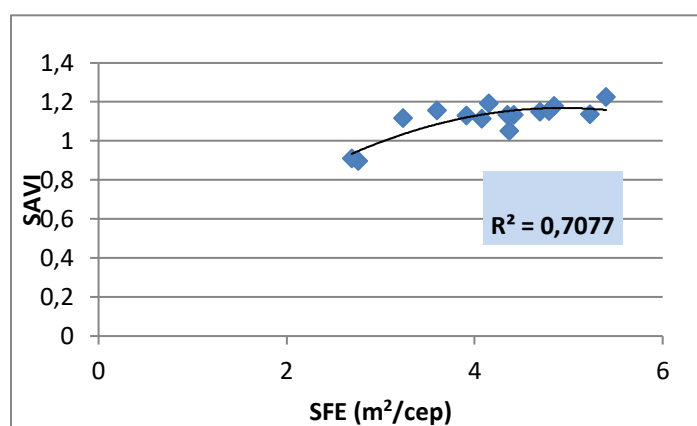


Figura 19. Relació entre l'índex SAVI i la SFE en ceps de la varietat Macabeu (n=16)

Font: pròpia

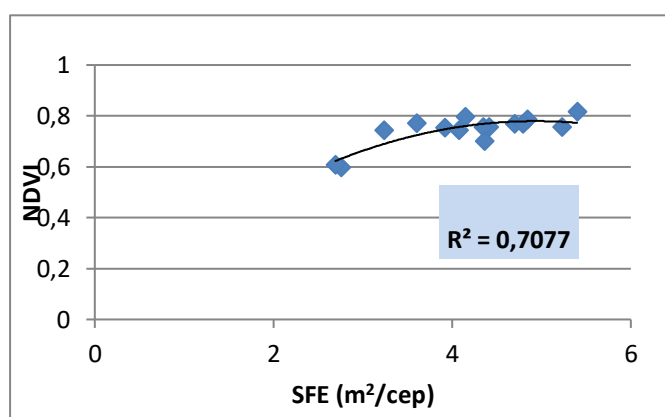


Figura 20. Relació entre l'índex NDVI i la SFE en ceps de la varietat Macabeu (n=16)

Font: pròpia

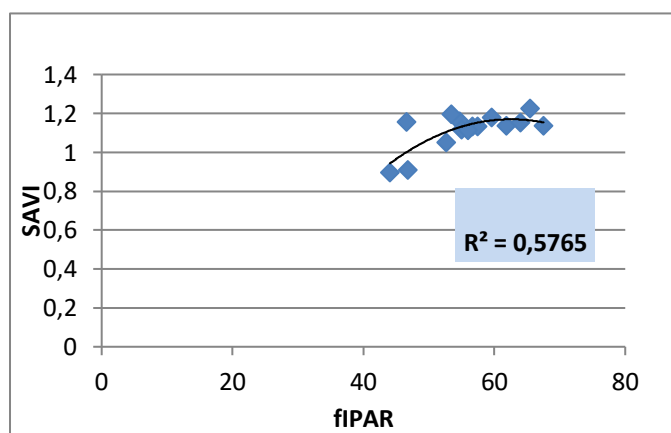


Figura 21. Relació entre l'índex SAVI i la fIPAR en ceps de la varietat Macabeu (n=16)

Font: pròpia

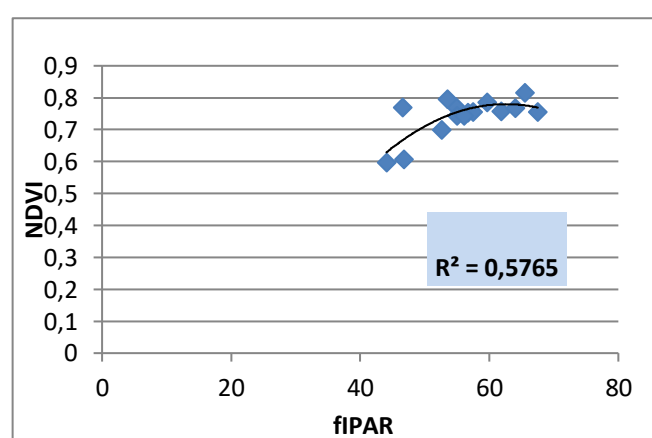


Figura 22. Relació entre l'índex NDVI i la fIPAR en ceps de la varietat Macabeu (n=16)

Font: pròpia

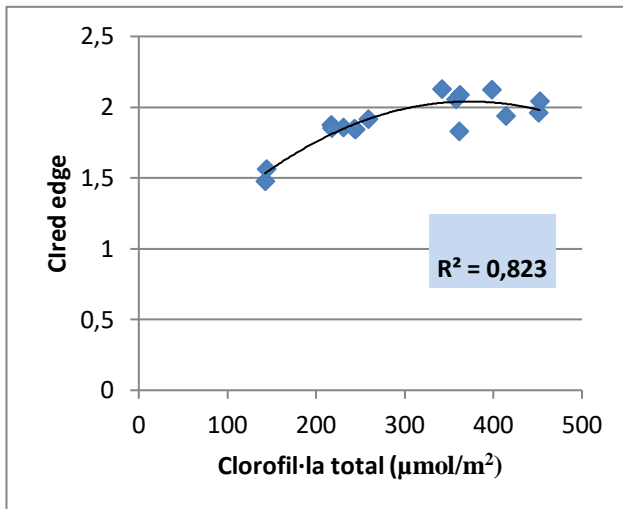


Figura 23. Relació entre l'índex Clred edge i el contingut de clorofil·la en fulla en ceps de la varietat Macabeu (n=16)

Font: pròpia

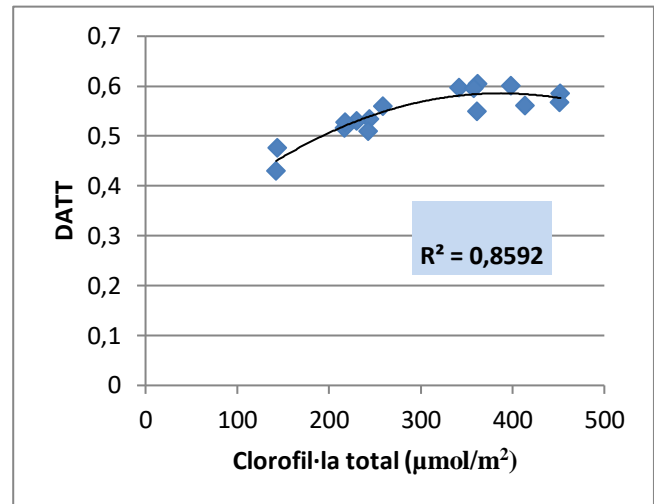


Figura 24. Relació entre l'índex DATT i el contingut de clorofil·la en fulla en ceps de la varietat Macabeu (n=16)

Font: pròpia

A les Figures 25 i 26 es representen els índexs NDVI i SAVI (derivats de la banda del roig i de l'infraroig proper) obtinguts a cada zona, que han presentat les relacions més significatives amb els dos paràmetres que informen sobre el vigor de la vinya: la superfície foliar exposada (SFE) i la fracció de radiació fotosintèticament activa interceptada (fIPAR).

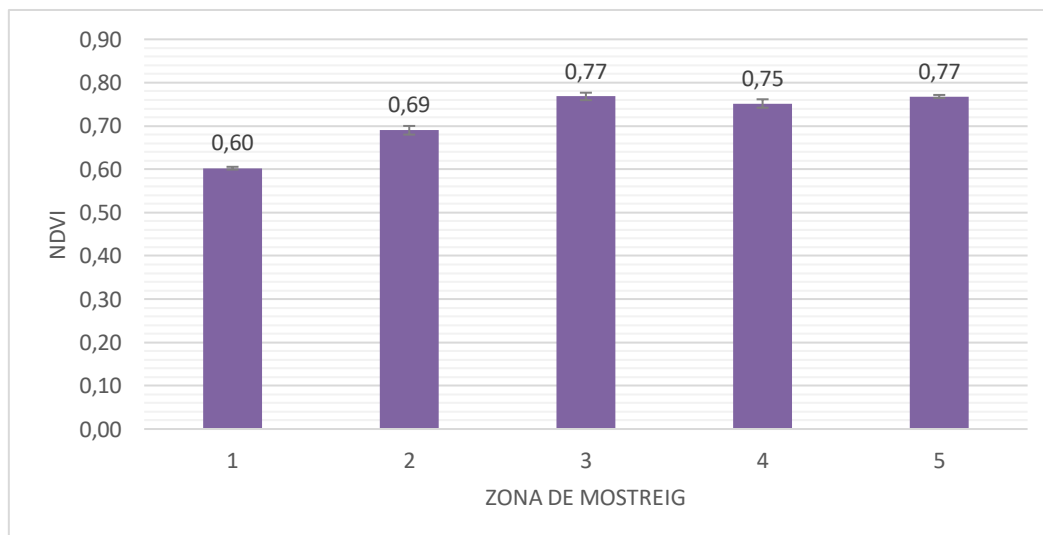


Figura 25. NDVI a cada zona de mostreig de la parcel·la. Els valors són la mitjana i error estàndard de la mitjana (n=16)

Font: pròpia

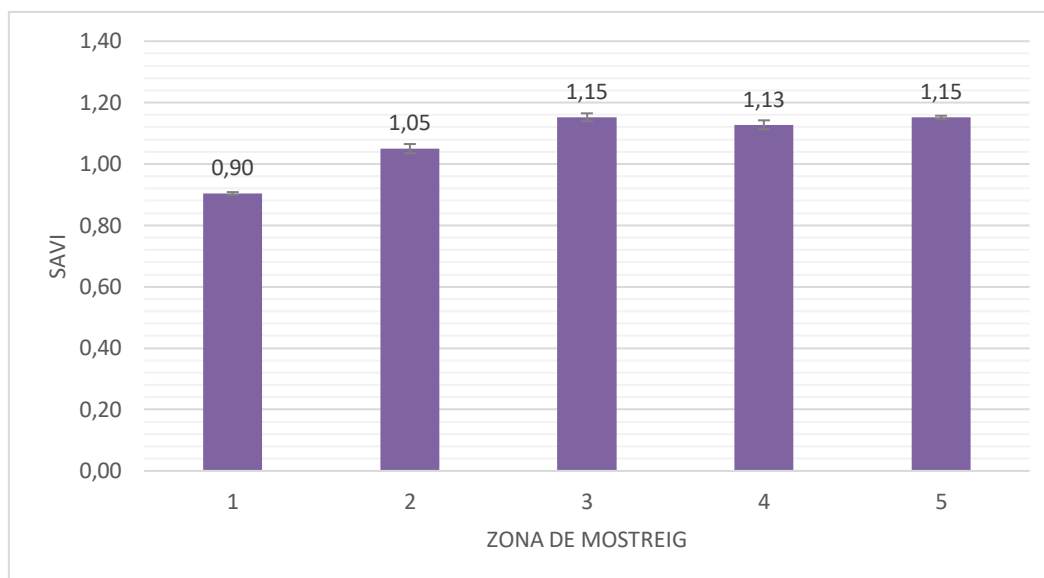


Figura 26. SAVI a cada zona de mostreig de la parcel·la. Els valors són la mitjana i error estàndard de la mitjana (n=16)

Font: pròpia

A continuació, a les Figures 27 i 28 es representen els índexs CI red edge i DATT (derivats de la banda del red edge) obtinguts a cada zona, que han presentat les relacions més significatives amb el contingut de clorofil·la de la vinya.

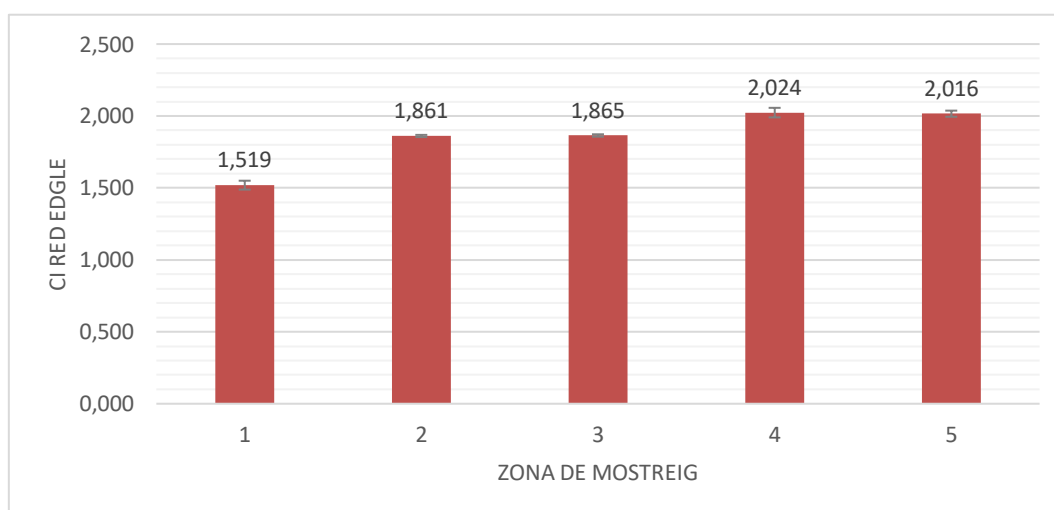


Figura 27. CI red edge a cada zona de mostreig de la parcel·la. Els valors són la mitjana i error estàndard de la mitjana (n=16)

Font: pròpia

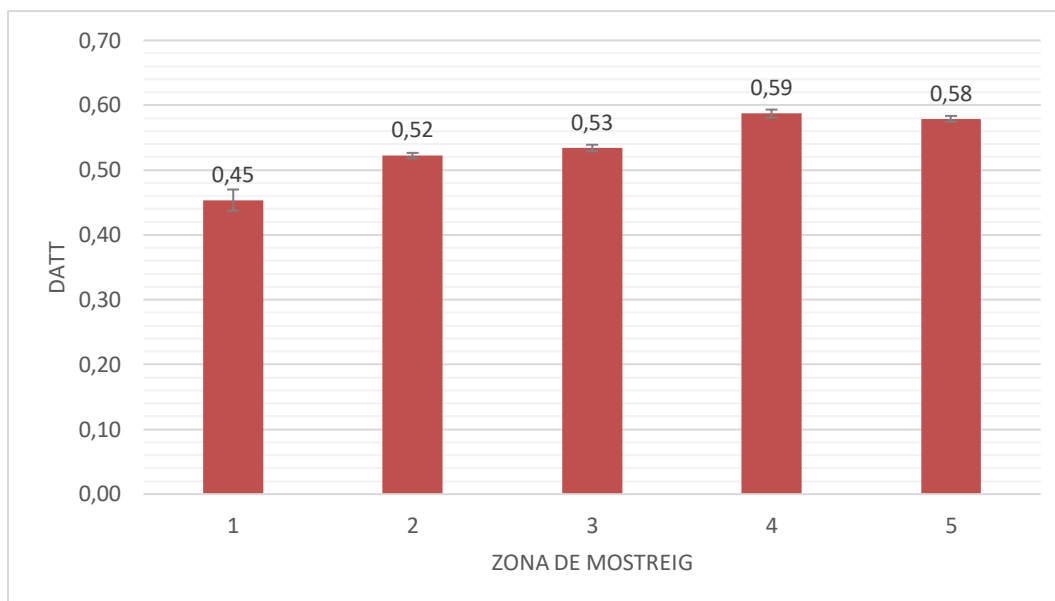


Figura 28. DATT a cada zona de mostreig de la parcel·la. Els valors són la mitjana i error estàndard de la mitjana (n=16)

Font: pròpia

5. DISCUSSIÓ DE RESULTATS

5.1. Vigor

Els índexs NDVI i SAVI han presentat les correlacions més significatives amb el vigor. Aquests dos índexs aporten la mateixa informació, les correlacions amb SFE i fIPAR presenten els mateixos R^2 . Teòricament, SAVI corregeix els efectes de la reflectivitat del sòl (Aparicio, 2015). En el nostre estudi, no es pot confirmar aquesta afirmació.

Els gràfics de NDVI i SAVI a cada zona de mostreig (Figura 25 i 26) tenen un comportament creixent de zona 1 a 5, però les zones 3,4 i 5 presenten valors molt similars. Cal tenir en compte, que aquests dos índexs han obtingut una correlació significant amb dues variables: SFE i fIPAR.

Els valors dels resultats obtinguts de fIPAR i SFE concorden amb els d'altres treballs on es van estudiar vinyes també de l'Alt Penedès (Catasús & Fernández, 2008). La SFE té un comportament creixent de zona 1 a 5. Quan es va mostrejar, es van apreciar característiques semblants entre zones 1 i 2 (ceps de poca grandària i altura) i les zones 3,4 i 5 (ceps vigorosos, alts i grans). En canvi, el % d' fIPAR no té una comportament creixent de zona 1 a 5, ja que el valor màxim s'obté a la zona 3. Aquest resultat no es va poder obviar el dia del mostreig. La combinació d'aquests dos comportaments, s'ha vist reflectida en els gràfics de NDVI i SAVI.

Estudis previs han mostrat la capacitat dels índexs NDVI i SAVI per estimar el vigor del cep de la varietat Pinot noir i Tempranillo (Bellvert, 2014). El nostre estudi confirma aquests resultats també en la varietat Macabeu. Els índexs estructurals són dels més coneguts i utilitzats. Basats en determinar la vegetació activa densa a partir del contrast entre la reflectivitat al vermell i l'infraroig pròxim, com major sigui el contrast entre aquestes bandes, major serà el vigor de la vegetació. NDVI és un dels índex més utilitzats en aplicacions de la teledetecció.

5.2. Clorosi

Els índex Cired Edge i DATT han presentat els coeficients de correlació més alts amb la concentració de clorofil·la.

Els valors dels gràfics del Cired Edge i DATT a cada zona de mostreig (Figura 27 i 28) tenen un comportament creixent de zona 1 a 5. De la mateixa forma que ho fa el gràfic de contingut de clorofil·la a cada zona de mostreig (Figura 18).

La zona de mostreig 1 ha obtingut els resultats més baixos de contingut en clorofil·la ($136 \pm 0.03 \mu\text{mol}/\text{m}^2$). En aquesta zona les fulles eren d'un color verd clar, però no havien de grogues. Quan es va realitzar el calibratge de clorofil·la es van seleccionar fulles grogues caigudes al terra i presenten valors 18-120 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$. D'altra banda, la zona de mostreig 5 ha obtingut els resultats més alts de contingut en clorofil·la ($413 \pm 7.55 \mu\text{mol}/\text{m}^2$). En aquesta zona el color de les fulles era verd obscur. En definitiva, les fulles no presenten clorosi a cap zona.

Estudis previs han mostrat la capacitat dels índexs extrets de la banda del red edge per detectar pigments en les plantes, i conseqüentment, clorosi. Hi ha tres pigments que contribueixen en la reflectància al visible de les fulles: clorofil·la a i b, carotenoides i antocians (clorofil·la a i b són els que es troben en més quantitat). Cired edge i DATT informen del contingut de clorofil·la a i b (Roberts, Roth & Perroy, 2011).

Els nostre estudi confirma que Cired edge i DATT permeten detectar clorosi en vinya de la varietat Macabeu.

CONCLUSIONS

Les conclusions que s'han pogut extreure en aquest treball han sigut les següents:

- Els lectors òptics de clorofil·la són bons indicadors del contingut de clorofil·la en fulla.
- NDVI i SAVI són bons indicadors del vigor en la varietat Macabeu.
- CI red edge i DATT són bons indicadors de clorosi en la varietat Macabeu.

BIBLIOGRAFIA

Aparicio Fernández, J., Tutora: Sánchez, N. (2015). *“Uso de medidas espectrales para la caracterización del viñedo”*. Treball final de Màster. Pàgines 63-68.

Apogee Instruments (2020). *“Owner’s Manual chlorophyll concentration meter Model MC-100”*. Pàgina 7. Data de consulta 01/10/2019.

Barnes, J.D., Balaguer, L., & Manrique, E. (1992). *“A reappraisal of the use of DMSO for the extraction and determination of chlorophylls a and b in lichens and higher plants”*. Al llibre Environmental and Experimental Botany. Volum 32. Tema 2. Pàgines 85-100. Data de consulta: 01/10/2019.

Bellvert, J., Directores: Fereres, E., & Zarco-Tejada, P. (2014). *“El uso de la teledetección de alta resolución como herramienta para realizar un manejo eficiente del riego en viñedos”* Tesis Doctoral. Pàgina 28.

Catalina-Tomàs, A., Directores: Martín, P., & González, M. (2015). *“Utilización de medidas de fluorescencia de la clorofila para monitorizar el estado nutricional y estimar el potencial enológico en viñedos afectados por clorosis férrica”*. Tesis Doctoral. Pàgines 21-31.

Catasús, R., & Fernández, C., Tutora: Serrano, L. (2008). *“Teledetecció de l’estructura i l’estat fisiològic de la vinya: prospecció d’indicadors de rendiment i qualitat del raïm (Vitis Vinifera cv. Chardonnay)”*. Treball final de Grau. Pàgines 1-19.

García, E. & Flego, F. (2007). *“Agricultura de precisión”*. Article a Tecnología Agropecuaria. Pàgines 99-116. Data de consulta 10/03/2020.



González-Flor, C., Serrano, L., Gorchs, G., Pons, J. (2014). *"Assessment of Grape Yield and Composition Using Reflectance-Based Indices in Rainfed Vineyards"*. A la revista Agronomy Journal. Volum 106. Tema 4. Pàgines 1309-1316. Data de consulta 10/10/2019.

Leiva, F. R. (2003). *"La agricultura de precisión: una producción más sostenible y competitiva con visión futurista"*. Conferencia presentada en el VIII Congrès de la Societat Colombiana de Fitomillora y Producció de Cultius, Bogotá. Data de consulta 10/10/2019.

Martínez-Casasnovas, J., & Arnó, J. (2014). *"Viticultura de precisión: de dónde venimos y hacia dónde vamos"*. Article online a ACENOLOGIA (Revista de Enología Científica y Profesional). Data de consulta: 14/02/2020.

Poblete-Echeverría, C., Olmedo, G. F., Ingram, B., & Bardeen, M. (2017). *"Detection and segmentation of vine canopy in ultra-high spatial resolution RGB imagery obtained from Unmanned Aerial Vehicle (UAV): A case study in a commercial vineyard"*. Article a la revista Remote Sensing Journal. Data de consulta 10/02/2020.

Roberts, A., Roth, L., Perroy, L. (2011). *"Hyperspectral vegetation indices"*. Article a University of California, Geography Department. Data de consulta 20/04/2020.

Rodríguez-Rey, C. Tutora: Serrano, L. (2009). *"Viticultura de precisión y Teledetección: relación entre índices de reflectancia espectral y parámetros de vigor en parcelas de viñedo de la variedad Chardonnay"*. Treball final de Grau. Pàgines 5-12.

Sancha, J.C., Director: Martínez, F. (2015). *"Experiencias innovadoras en la viticultura de la DO Ca Rioja"*. Tesis Doctoral. Pàgina 122-124.

Tardáguila, J., & Martínez, F. (2004). *"Estimacion de la calidad de la uva en el viñedo mediante la utilización de la ficha VITUR"*. Article a la revista ZUBÍA. Volum 16-17. Pàgines 59-68. Data de consulta 15/03/2020.